近60 a新疆开都-孔雀河流域大气饱和水汽压差变化特征及影响因子

李晓琦[1]， 李漠岩[1,2]， 李佳卉[1]， 姚俊强[3]， 许兴斌[1,2]
（1. 新疆师范大学地理科学与旅游学院,新疆 乌鲁木齐 830054；2. 新疆干旱区湖泊环境与资源实验室,新疆 乌鲁木齐 830054；3. 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所,新疆 乌鲁木齐 830002）

摘 要：基于1961—2021年新疆开都-孔雀河流域逐月气温和相对湿度观测数据,分析开都-孔雀河流域大气饱和水汽压差、饱和水汽压及实际水汽压的变化趋势,探讨山地、绿洲、荒漠环境下大气饱和水汽压差变化特征,揭示了大气饱和水汽压差变化的影响因子。结果表明:(1) 1961—2021年开都-孔雀河流域年及四季大气饱和水汽压差总体呈上升趋势,并呈阶段性变化特征,其中1997年发生突变,从1961—1996年的下降趋势突变为1997—2021年的上升趋势,揭示了1997年以后大气干旱加剧,尤其在春季。(2) 不同环境下大气饱和水汽压差变化趋势与气温和实际水汽压的变化趋势一致,其中荒漠环境下大气饱和水汽压差增长速率最大,其次是绿洲和山地环境。(3) 大气饱和水汽压差与温度变化呈正相关,而与相对湿度变化呈负相关;1997年以来气温快速升高而相对湿度迅速降低是导致大气饱和水汽压差加速上升的主要原因;此外,实际水汽压的增长速率小于饱和水汽压的增长速率。研究成果有助于深入理解大气干旱过程及对气候变化的响应关系。

关键词：饱和水汽压差(*VPD*)；实际水汽压；变化特征；影响因子；开都-孔雀河

大气饱和水汽压差是指在一定温度下饱和水汽压(Saturated Vapor Pressure,*es*)与空气中实际水汽压(Actual Vapor Pressure,*ea*)的差值,反映了实际大气中水汽距离饱和的程度,即空气的干燥程度[1]。大气饱和水汽压差是大气干旱的监测指标,同时也是生态系统光合作用的重要气候调节因子,反映了大气的干旱程度和植物的蒸发压力[2],对半干旱地区植物蒸腾及草原碳通量变化有重要影响[3]。相关研究表明,大气水汽亏缺增加影响全球植被生长[4],极端高温也对美国玉米产量有关键影响[5];在森林生态系统中,大气水分需求比土壤湿度更易限制土壤饱和导水率和蒸散量[6]。上述研究成果进一步证实了大气饱和水汽压差对气候和生态系统的重要性。

当今全球气候变暖毋庸置疑[7]。IPCC第六次评估报告指出[8],将气候变暖控制在1.5 ℃面临前所未有的挑战。2011—2020年全球地表温度比1850—1900年增加了1.1 ℃[9]。全球地表温度升高,饱和水汽压增加,进而导致大气饱和水汽压差不断增大[10]。大气饱和水汽压差增加导致土壤蒸发量和陆地生态系统蒸发量(*ET*)增加,当大气饱和水汽压差达到一定阈值时,严重干旱引发植被光合和生长速率减少以及碳饥饿,导致生态系统水分胁迫事件增加[11]。大气中实际水汽压(*ea*)不仅受到饱和水汽压(*es*)影响,也受到气温和相对湿度影响。

新疆位于我国西北干旱地区,地处亚欧大陆腹地,远离海洋,对气候变化非常敏感,是典型的生态脆弱区[12]。目前,新疆气候"暖湿化"问题受到了广泛关注。研究表明,1961—2019年新疆经历了显著的由干向湿的转折,年降水量增加,参考作物蒸散

收稿日期：2024-06-20； **修订日期**：2024-08-01
基金项目：新疆人才发展基金"天池英才"引进计划青年博士项目;上海合作组织科技伙伴计划及国际科技合作计划项目(2023E01022,2023E01005);中国沙漠气象科学研究基金(Sqj2023017)
作者简介：李晓琦(2002-),男,主要从事干旱区气候与水循环研究. E-mail: 15588528726@163.com
通讯作者：李漠岩. E-mail: limy525@126.com

量减少[13];2000—2019年新疆干旱状况有所缓解,整体呈“暖湿化”,其中春季显著变干,秋季显著变湿,夏季和冬季呈变湿趋势[14]。针对开都-孔雀河流域,1961—2019年流域极端高温指数明显上升,气温日较差(*DTR*)和极端低温指数下降,而各极端降水指数变化不明显,其中最多连续无雨日数(*CDD*)显著下降[15]。

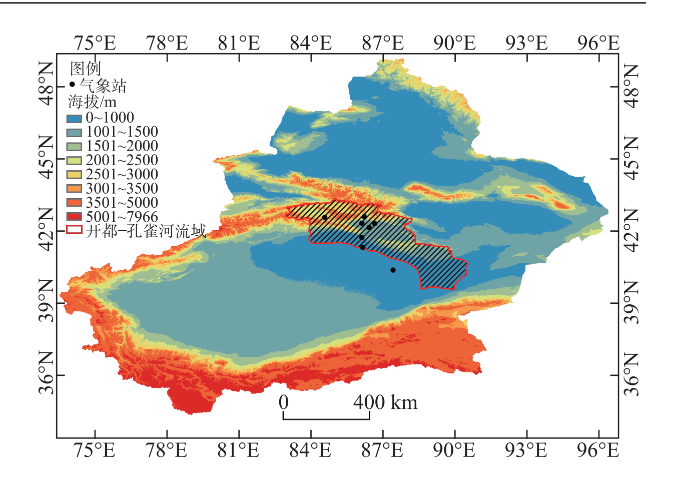
近年来,国内外针对大气饱和水汽压差的研究大多以全球或者国家区域尺度为主,对于流域尺度的研究涉及较少。开都-孔雀河流域气候变化研究已经取得进展,但涉及大气饱和水汽压差研究较少,而大气饱和水汽压差对区域大气干旱状况及植被水分有重要的指示意义。因此,本文以开都-孔雀河流域为例,分析1961—2021年流域大气饱和水汽压差及其相关变量(气温、相对湿度、饱和水汽压和实际水汽压)的变化趋势,探讨山区、绿洲、荒漠等不同环境下大气饱和水汽压差变化特征,揭示大气饱和水汽压差变化的影响因素,研究成果对提高区域气候变化及大气干旱过程的科学认识有重要的参考价值。

1 数据与方法

1.1 数据来源

开都-孔雀河流域是塔里木河流域的重要组成部分,地处新疆巴音郭楞蒙古自治州(简称“巴州”)境内,包括和静县、和硕县、焉耆县、博湖县、库尔勒市以及尉犁县的部分地区,整个流域河流自西北方向流向东南方向,地理位置为82°57′~90°39′E,40°25′~43°21′N。流域西北部为开都河流域,西南部为孔雀河流域,整个流域的高程分布不均匀,海拔为700~4800 m。流域多年平均气温为7.3~10.9 ℃,多年平均年降水量为47.3~270.0 mm,降水主要集中在6—8月,多年平均年潜在蒸发量为1887~2777 mm,流域气温呈显著增加趋势,降水呈波动增加趋势[16]。

选取开都-孔雀河流域1961—2021年逐月气温和相对湿度观测数据,包括巴音布鲁克、巴仑台、和静、和硕、焉耆、库尔勒、尉犁、铁干里克等8个气象观测站(图1),数据来自于中国气象局国家气象信息中心。考虑到开都-孔雀河流域存在山地、绿洲和荒漠等不同环境,本文将开都-孔雀河流域划分为3个区域:山区代表站为巴音布鲁克和巴仑台;绿洲代表站为和静、和硕、焉耆和库尔勒;荒漠代表站为尉犁和铁干里克。以上气象数据均通过了严格的质量控制,可用于气候变化分析。



注:底图采用自然资源部标准地图制作,审图号为GS(2023)2767号,对底图边界无修改。

图1 开都-孔雀河流域地理位置和气象站分布

Fig. 1 Geographical location and distribution of meteorological stations in Kaidu-Kongque River Basin

1.2 研究方法

1.2.1 大气饱和水汽压差、饱和水汽压和实际水汽压 大气饱和水汽压差定义为饱和水汽压和实际水汽压的差值,根据以下公式[17],计算开都-孔雀河流域各气象站的逐月饱和水汽压、实际水汽压和大气饱和水汽压差。具体公式如下:

$$es = 0.611\exp\left[\frac{17.27 \times T_a}{T_a + 237.5}\right] \tag{1}$$

$$ea = \frac{RH \times es}{100} \tag{2}$$

$$VPD = es - ea \tag{3}$$

式中:*es*为饱和水汽压(kPa);*ea*为实际水汽压(kPa);T_a为空气温度(℃);*RH*为相对湿度(%);*VPD*为饱和水汽压差(kPa)。

1.2.2 统计分析 采用非参数Sea斜率估计方法分析大气饱和水汽压差、饱和水汽压、实际水汽压、气温和相对湿度的线性趋势[18],Mann-Kendall检验方法确定大气饱和水汽压差等要素的突变检验和变化趋势的显著性检验[19-20],本研究选用通过95%的显著性检验。

采用偏相关分析(PAC)确定气候因素对大气饱和水汽压差变化的影响。偏相关系数(PCC)的计算方法如下[21-22]:

$$R_{xy,z} = \frac{R_{xy} - R_{xz}R_{yz}}{\sqrt{1 - R_{xz}^2}\sqrt{1 - R_{yz}^2}} \tag{4}$$

式中：x是因变量；y和z是自变量。$R_{xy,z}$表示控制z变量的影响后变量x和变量y之间的偏相关系数；R_{xy}、R_{xz}和R_{yz}分别为变量x与y、x与z及y与z之间的简单相关系数。在本研究中，变量x表示大气饱和水汽压差，y和z分别代表气温和相对湿度。

2 结果与分析

2.1 气温和相对湿度的变化趋势

1961—2021年开都-孔雀河流域年均气温的变化趋势存在显著的空间差异(图2，表1)。总体而言，流域气温变化趋势为0.217 ℃·(10a)$^{-1}$，其中荒漠区的升温速率最大，达到0.282 ℃·(10a)$^{-1}$，显著大于流域平均水平；其次是绿洲区，为0.216 ℃·(10a)$^{-1}$，山区的升温速率最小，为0.154 ℃·(10a)$^{-1}$。整个流域及其各分区四季气温普遍经历了升温过程。其中，冬季的气温变化趋势最显著，达到了0.309 ℃·(10a)$^{-1}$；其次是春季，增温速率为0.257 ℃·(10a)$^{-1}$；夏季和秋季的气温趋势相差不大，分别为0.169 ℃·(10a)$^{-1}$和0.129 ℃·(10a)$^{-1}$。

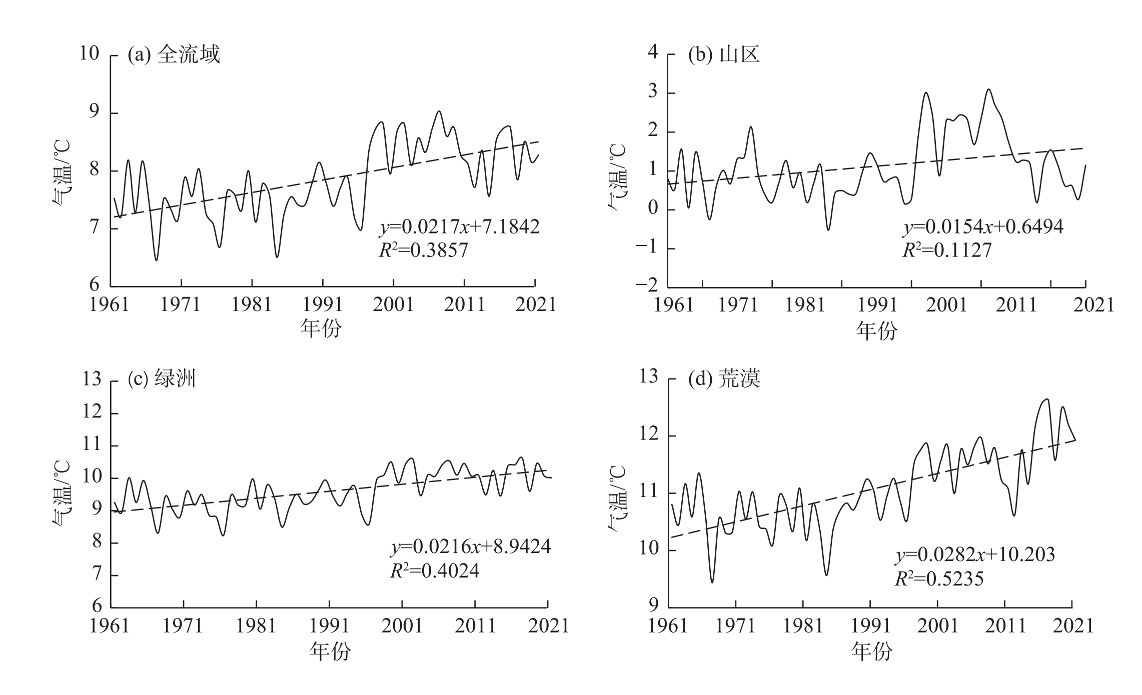


图2 1961—2021年新疆开都-孔雀河流域及其分区温度变化趋势

Fig. 2 Temperature variation trend of Kaidu-Kongque River Basin and its subregions in Xinjiang from 1961 to 2021

表1 1961—2021年新疆开都-孔雀河流域及其分区的年及季节T_a和RH的变化趋势

Tab. 1 The annual and seasonal variation trends of T_a and RH in Kaidu-Kongque River Basin and its subregions in Xinjiang from 1961 to 2021

	季节	山区	绿洲	荒漠	全流域趋势
T_a/[℃·(10a)$^{-1}$]	年	0.154	0.216	0.282*	0.217
	春季	0.149	0.267*	0.344**	0.257*
	夏季	0.150	0.136	0.217	0.169
	秋季	0.174	0.127	0.194	0.129
	冬季	0.171	0.333**	0.401**	0.309*
RH/[%·(10a)$^{-1}$]	年	−0.058	0.535**	−0.207	0.201
	春季	0.012	0.066	−0.486**	−0.085
	夏季	0.495**	0.493**	0.048	0.382**
	秋季	−0.041	0.704**	−0.269*	0.274*
	冬季	−0.721**	0.764**	−0.321*	0.122

注：*表示在95%的显著性水平上趋势显著。**表示在99%的显著性水平上趋势显著。下同。

1961—2021年开都-孔雀河流域相对湿度变化趋势为0.201%·(10a)$^{-1}$(图3)，其中绿洲区呈上升趋势，增长速率为0.535%·(10a)$^{-1}$；而山区和荒漠区相对湿度呈下降趋势，分别为-0.058%·(10a)$^{-1}$和-0.207%·(10a)$^{-1}$。开都-孔雀河流域各季节相对湿度数据显示，夏季、秋季和冬季变化呈上升趋势，增长速率分别为0.382%·(10a)$^{-1}$、0.274%·(10a)$^{-1}$和0.122%·(10a)$^{-1}$，而春季则有下降趋势，为-0.085%·(10a)$^{-1}$。

2.2 大气饱和水汽压差、饱和水汽压、实际水汽压的变化趋势

1961—2021年开都-孔雀河流域及分区大气饱和水汽压差变化均呈上升趋势(图4，图5)，但增长速率在不同分区存在显著差异(表2)。流域大气饱和水汽压差增长速率为0.007 kPa·(10a)$^{-1}$，其中荒漠

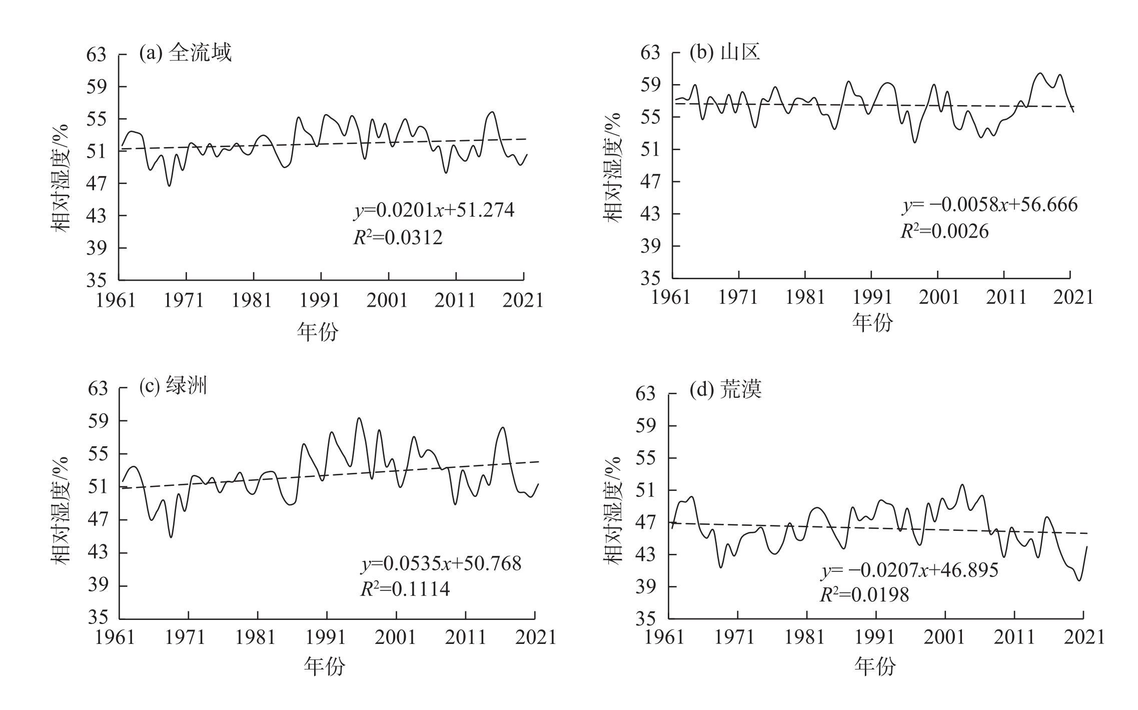


图3 1961—2021年新疆开都-孔雀河流域及其分区相对湿度变化趋势

Fig. 3 Variation trend of *RH* in Kaidu-Kongque River Basin and its subregions in Xinjiang from 1961 to 2021

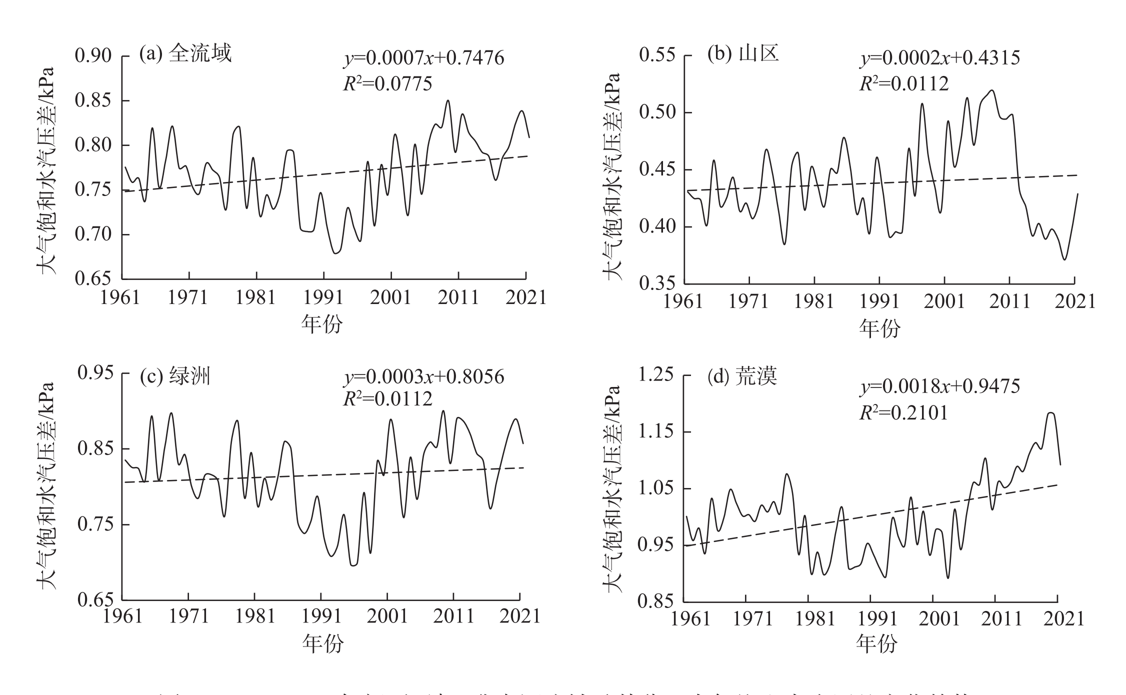


图4 1961—2021年新疆开都-孔雀河流域及其分区大气饱和水汽压差变化趋势

Fig. 4 Variation trend of *VPD* in Kaidu-Kongque River Basin and its subregions in Xinjiang from 1961 to 2021

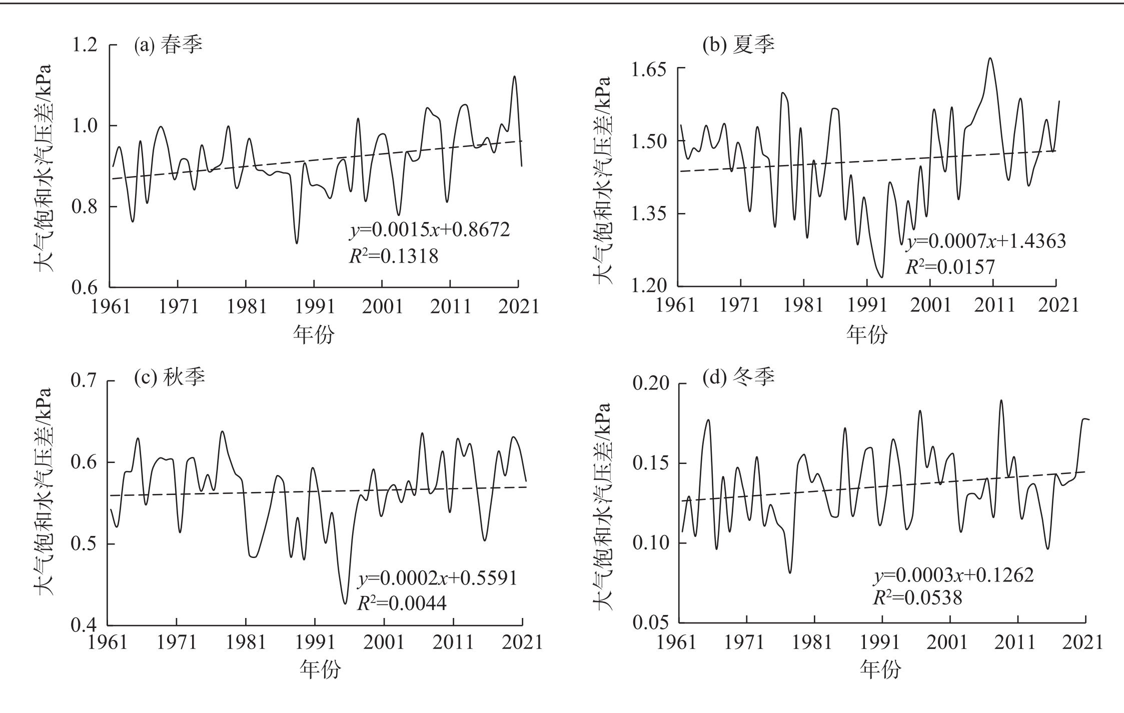


图5 1961—2021年新疆开都-孔雀河流域四季大气饱和水汽压差变化趋势

Fig. 5 Variation trend of *VPD* in four seasons in Kaidu-Kongque River Basin, Xinjiang from 1961 to 2021

表2 1961—2021年新疆开都-孔雀河流域及其分区的年和季节大气饱和水汽压差的变化趋势

Tab. 2 The variation trend of annual and seasonal *VPD* in Kaidu-Kongque River Basin and its subregions in Xinjiang from 1961 to 2021

	季节	山区	绿洲	荒漠	全流域趋势
VPD/[kPa·(10a)⁻¹]	年	0.002	0.003	0.018	0.007
	春季	0.004	0.014	0.031	0.015
	夏季	−0.003	0.003	0.026	0.007
	秋季	0.005	−0.004	0.010	0.002
	冬季	0.003	0.001	0.007	0.003

区增长速率最快,达到了0.018k Pa·$(10a)^{-1}$,其次是绿洲区,增长率为0.003 kPa·$(10a)^{-1}$,山区增长速率最慢,为0.002 kPa·$(10a)^{-1}$。开都-孔雀河流域及各分区四季大气饱和水汽压差也呈上升趋势,其中春季增长速率最快,达到了0.015 kPa·$(10a)^{-1}$,其次是夏季,增长率为0.007 kPa·$(10a)^{-1}$,冬季和秋季的大气饱和水汽压差趋势相差不大,分别为0.003 kPa·$(10a)^{-1}$和0.002 kPa·$(10a)^{-1}$。

不同环境下气温、降水和水汽等气候变量变化存在显著差异[23-24],不同环境下大气饱和水汽压差变化趋势可知(图6),荒漠区大气饱和水汽压差增长速度最快,绿洲区和山区变化趋势相差不大(图6a)。不同环境下大气饱和水汽压差趋势与气温和实际水汽压的变化趋势一致,但荒漠区的增长速率更快,可能是由于荒漠环境中气温最高、相对湿度最低,使得气温和实际水汽压变化相对于山地和绿洲环境更为明显。

开都-孔雀河流域各分区大气饱和水汽压差四季变化趋势呈各分区四季大气饱和水汽压差趋势与年变化趋势一致,所有分区中冬季大气饱和水汽压差增幅最小,除1961—2021年山区和1997—2021年夏季外,其他分区春季增幅最大,1961—2021年荒漠和绿洲区大气饱和水汽压差趋势小于1997—2021年大气饱和水汽压差趋势(图6c)。说明流域气温在冬季上升最快,但大气饱和水汽压差增加却不显著(图6b,图6c),这可能是因为开都-孔雀河流域冬季积雪覆盖面积大,导致气温相对偏低而相对湿度偏高。

相关研究表明新疆地区饱和水汽压差呈显著上升趋势[25]。饱和水汽压差由饱和水汽压和实际水汽压决定,受气温和相对湿度的影响。饱和水汽压差的变化与温度变化呈正相关,与相对湿度变化呈负相关,且不同地理环境下,荒漠环境大气饱和水汽压差变化最大,其次是绿洲和山区。本文研究结果与之一致。

由开都-孔雀河流域大气饱和水汽压差变化特

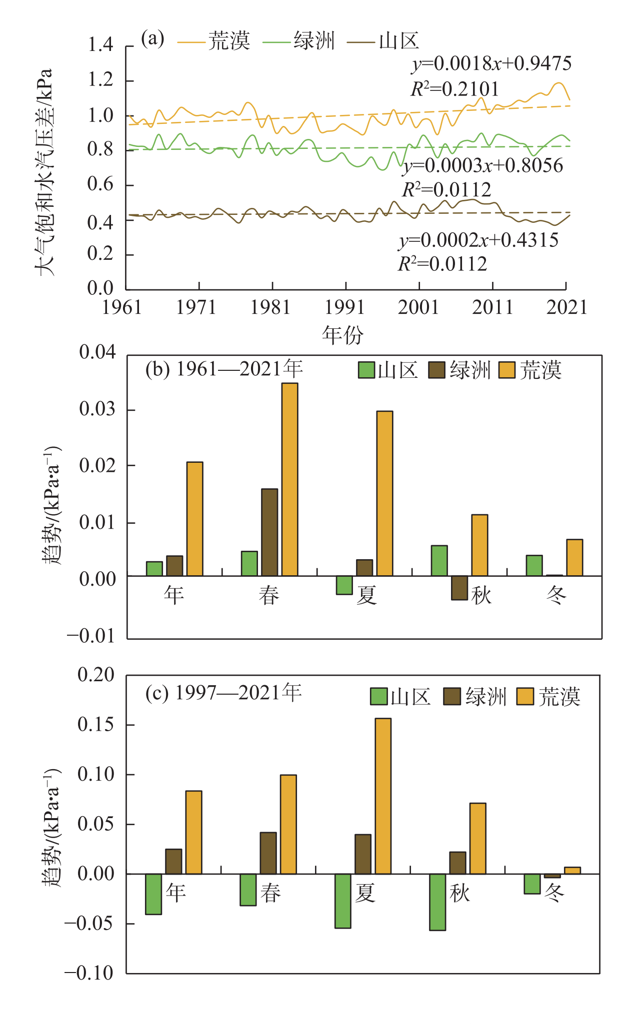


图6　1961—2021年和1997—2021年新疆开都–孔雀河流域各分区及其年与季节大气饱和水汽压差的变化趋势

Fig. 6　Variation trend of annual and seasonal *VPD* in Kaidu-Kongque River Basin in Xinjiang from 1961 to 2021 and from 1997 to 2021

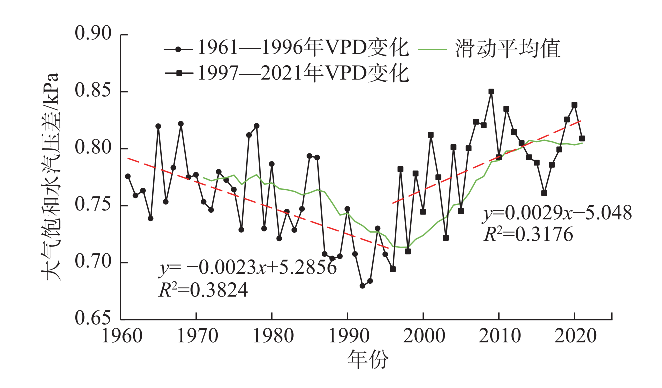


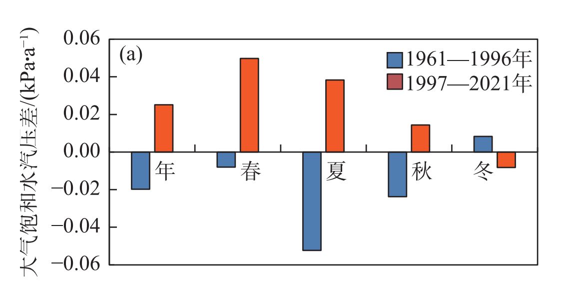
图7　1961—2021年新疆开都–孔雀河流域大气饱和水汽压差变化特征

Fig. 7　Variation trend of *VPD* in Kaidu-Kongque River Basin, Xinjiang from 1961 to 2021

征可知(图7)，1961—2021年开都–孔雀河流域大气饱和水汽压差在1997年发生突变，其中1961—1996年呈下降趋势，为−0.023 kPa·(10a)$^{-1}$，而1997—2021年呈上升趋势，增长率为0.029 kPa·(10a)$^{-1}$。

1961—1996年开都–孔雀河流域大气饱和水汽压差四季变化趋势存在显著差异(图8)，其中冬季大气饱和水汽压差变化呈上升趋势，达到0.01 kPa·(10a)$^{-1}$；而春季、夏季、秋季大气饱和水汽压差变化呈下降趋势，其中夏季下降速率最快，达到−0.05 kPa·(10a)$^{-1}$，春季和秋季变化趋势相差不大，分别为−0.01 kPa·(10a)$^{-1}$和−0.02 kPa·(10a)$^{-1}$。1997—2021年流域春季、夏季、秋季大气饱和水汽压差变化呈上升趋势，其中春季的增加速率最快，达到0.05 kPa·(10a)$^{-1}$，其次是夏季，增长率为0.04 kPa·(10a)$^{-1}$，秋季增加速率最慢，为0.01 kPa·(10a)$^{-1}$，而冬季呈下降趋势，为−0.01 kPa·(10a)$^{-1}$。

大气饱和水汽压差变化主要受饱和水汽压和实际水汽压的影响。开都–孔雀河流域年及季节饱和水汽压变化趋势显著，饱和水汽压变化趋势为0.018 kPa·(10a)$^{-1}$，其中夏季的增长速率最快，达到0.029 kPa·(10a)$^{-1}$，其次是春季，为0.023 kPa·(10a)$^{-1}$，秋季和冬季变化趋势相差不大，分别为0.012 kPa·(10a)$^{-1}$和0.009 kPa·a^{-1}(图9，表3)。流域实际水汽压年及四季变化趋势均呈上升趋势，实际水汽压变化趋势为



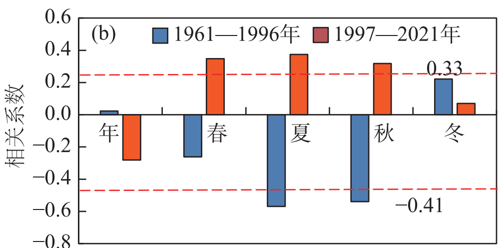


图8　新疆开都–孔雀河流域*VPD*变化趋势及年与季节*VPD*之间的相关系数

Fig. 8　Variation trend of *VPD* and correlation coefficient between annual and seasonal *VPD* in Kaidu-Kongque River Basin, Xinjiang

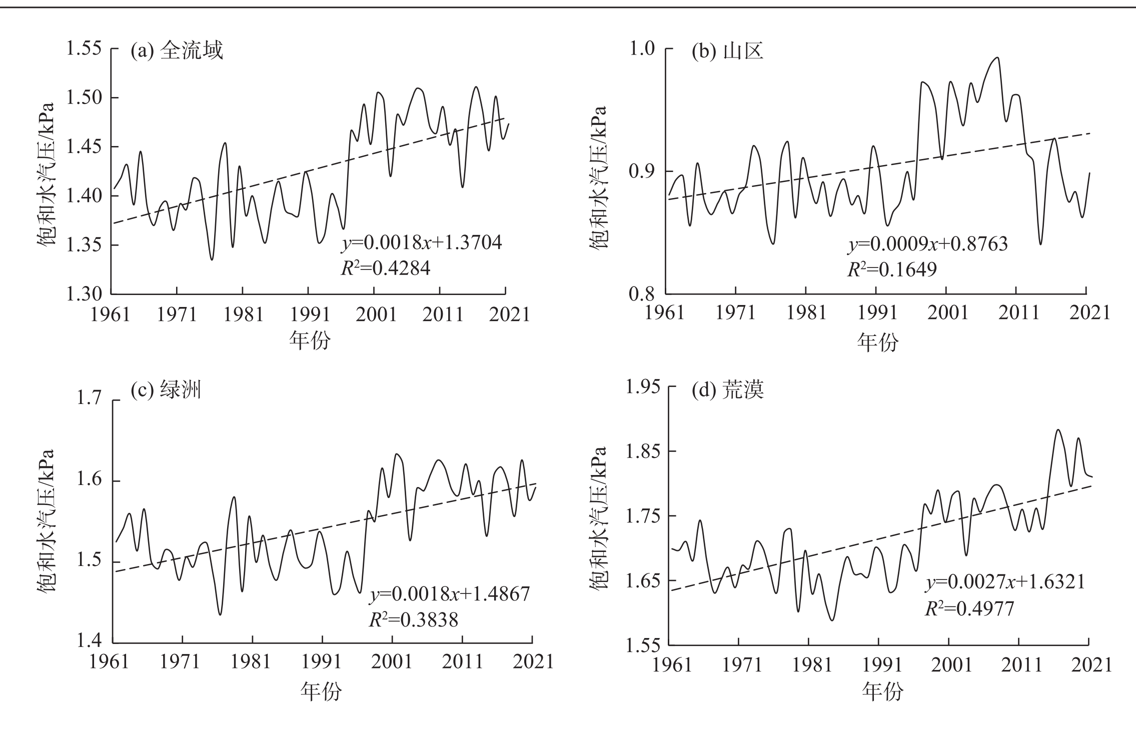


图9 1961—2021年新疆开都-孔雀河流域及其分区*es*变化趋势

Fig. 9 Variation trend of *es* in Kaidu-Kongque River Basin and its subregions in Xinjiang from 1961 to 2021

表3 1961—2021年新疆开都-孔雀河流域及其分区的年和季节*es*和*ea*的变化趋势

Tab. 3 The annual and seasonal variation trends of *es* and *ea* in Kaidu-Kongque River Basin and its subregions in Xinjiang from 1961 to 2021

	季节	山区	绿洲	荒漠	全流域趋势
es/[kPa·(10a)$^{-1}$]	年	0.009	0.018	0.027	0.018
	春季	0.008	0.024	0.034	0.023
	夏季	0.014	0.028	0.044	0.029
	秋季	0.010	0.011	0.017	0.012
	冬季	0.004	0.010	0.013	0.009
ea/[kPa·(10a)$^{-1}$]	年	0.007	0.015	0.009	0.011
	春季	0.004	0.010	0.004	0.007
	夏季	0.017	0.026	0.018	0.022
	秋季	0.005	0.015	0.008	0.010
	冬季	0.003	0.009	0.006	0.006

0.011 kPa·(10a)$^{-1}$,其中夏季增加速率最快,达到0.022 kPa·(10a)$^{-1}$,春季、秋季及冬季变化趋势相差不大,分别为0.007 kPa·(10a)$^{-1}$、0.010 kPa·(10a)$^{-1}$和0.006 kPa·(10a)$^{-1}$(图10,表3)。总体而言,实际水汽压的增长速率小于饱和水汽压的增长速率。

2.3 大气饱和水汽压差与气温和相对湿度的关系

气温和相对湿度显著影响着大气饱和水汽压差的变化[25],但气温或相对湿度对大气饱和水汽压差变化的具体贡献尚未明确。因此,采用相关分析和偏相关分析来研究大气饱和水汽压差和气温、相对湿度之间的关系(图11)。大气饱和水汽压差和气温、相对湿度之间均存在显著相关性。各分区大气饱和水汽压差变化与气温呈正相关,与相对湿度呈负相关,其中春季大气饱和水汽压差与气温的相关性最大,相关系数在0.74~0.81之间;夏季大气饱和水汽压差与相对湿度的相关性最大,相关系数在-0.83~-0.92。

偏相关分析研究结果显示,夏季流域及其分区大气饱和水汽压差与气温的相关性最强,相关系数在0.92~0.99,大气饱和水汽压差与相对湿度相关性也在夏季达到最强,相关系数在-0.98~-1.0(图11)。总体而言,大气饱和水汽压差与气温(或相对湿度)之间存在显著的相关性,在夏季最为明显,且大气饱和水汽压差与相对湿度的偏相关大于大气饱和水汽压差与气温的偏相关,表明相对湿度对开都-孔雀河流域大气饱和水汽压差变化的贡献更为显著。

3 讨论

已有研究表明,1980—2018年我国大气饱和水汽压差分布存在显著的空间差异和季节差异,大气饱和水汽压差变化趋势均呈现出夏季>春季>秋季>冬季的特征,在西北干旱区,新疆大气饱和水汽压

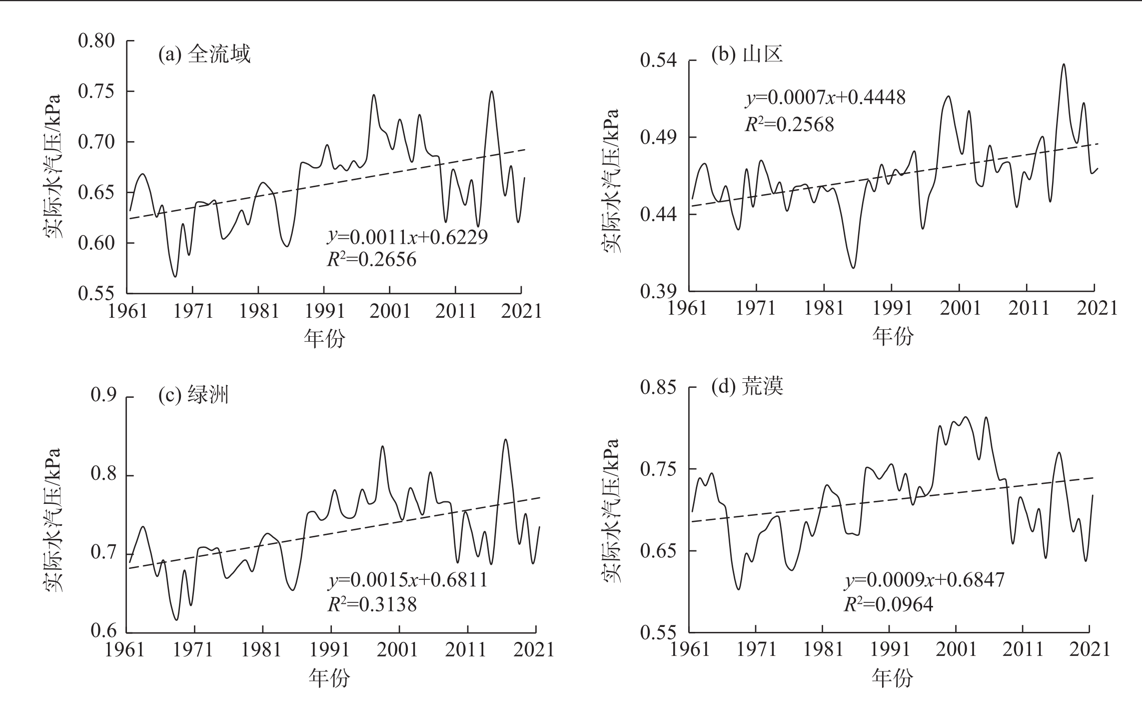


图10　1961—2021年新疆开都-孔雀河流域及其分区 *ea* 变化趋势

Fig. 10　Variation trend of *ea* in Kaidu-Kongque River Basin and its subregions in Xinjiang from 1961 to 2021

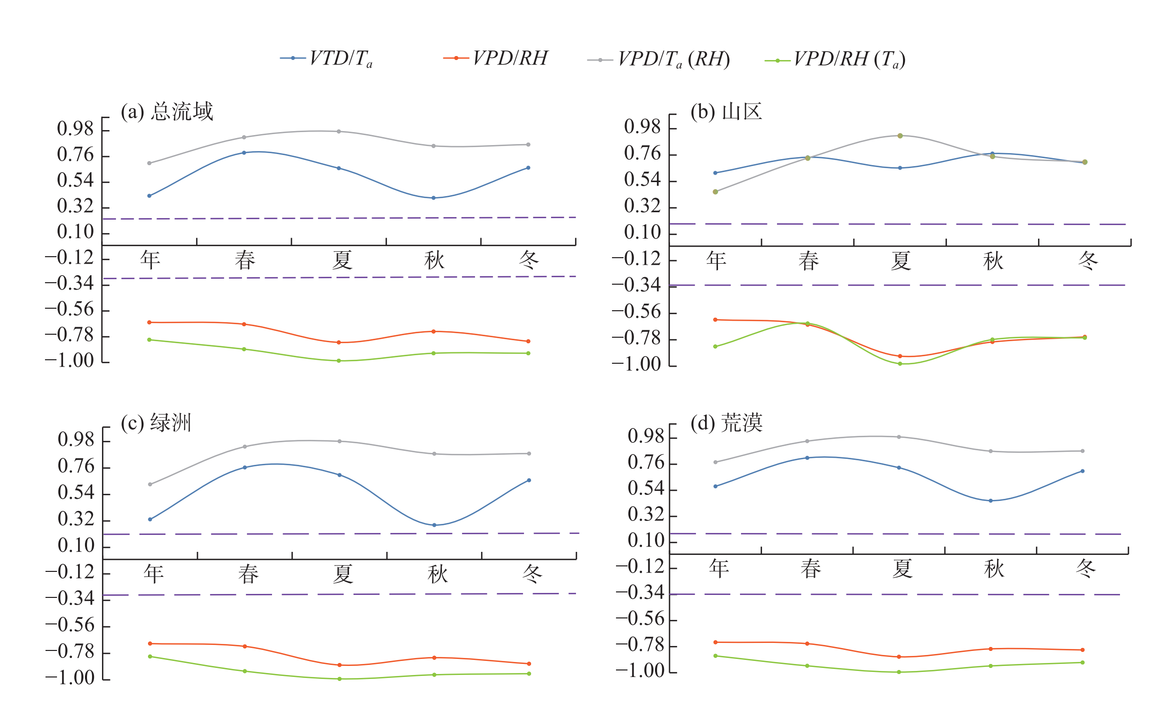


图11　新疆开都-孔雀河流域及分区的年、四季影响因子的偏相关性变化

Fig. 11　Partial correlation of annual and seasonal influencing factors in Kaidu-Kongque River Basin and its subregions in Xinjiang

差最高，近30 a西北地区的饱和水汽压差呈上升趋势[26-27]，其中新疆的上升幅度最大[26]。1961—2020年青海省大气饱和水汽压差趋势呈上升趋势，且在1998年发生突变，季节趋势表现为夏季>春季>秋季>冬季，影响大气饱和水汽压差的主导因子为温度和相对湿度[27]。本研究发现，1961—2021年新疆开都-孔雀河流域大气饱和水汽压差变化呈上升趋势，且在1997年发生突变。这与我国以及青海省大气饱和水汽压差趋势相一致。针对不同季节，1961—2021年新疆开都-孔雀河流域大气饱和水汽

压差变化趋势表现为春季>夏季>秋季>冬季，与我国以及青海省季节大气饱和水汽压差趋势有所差异，这可能是因为1961—2021年开都-孔雀河流域春季气温增温速率快而相对湿度下降，导致了大气饱和水汽压差快速上升。2000年以来全球及区域相对湿度急剧下降[28-29]，气温升高和相对湿度降低是导致新疆开都-孔雀河流域大气饱和水汽压差增加的主要原因，且相对湿度对大气饱和水汽压差变化的贡献更为显著。大气饱和水汽压差表示给定温度下的饱和水汽压和实际水汽压之间的差异[30]，如果实际水汽压的增加速率与饱和水汽压的增加速率不完全相同，也会导致饱和水汽压差的变化[4]。开都-孔雀河流域实际水汽压的增长速率小于饱和水汽压的增长速率，温度上升影响相对湿度变化，进而导致饱和水汽压差增加。

本研究发现开都-孔雀河流域大气饱和水汽压差变化在不同季节变化速率不同，其中春季增加速率最快，可能是由于春季饱和水汽压快速增加，而实际水汽压增长不显著，导致了大气饱和水汽压差较快的增长速率。针对不同的地理环境，荒漠区大气饱和水汽压差增长速率比绿洲和山区增长速率快，可能是因为与绿洲和山区相比，荒漠区气温高、降水稀少、蒸发强烈，缺乏稳定的水汽来源，相对湿度较低，较高的气温和较低的相对湿度使得荒漠区大气饱和水汽压差增加速率最大。

大气饱和水汽压差增加对植被生长速率具有较大影响[31]。开都-孔雀河流域大气饱和水汽压差快速上升，使得大气干旱加剧，增加植被蒸发量，进而影响植被的光合作用，对生态环境的影响和生态风险将会增大。此外，蒸发增加还会导致干旱和土壤水分的流失[32]，浅根植物死亡，物种多样性减少[33]。因此，需加强关注流域尺度大气饱和水汽压差变化，强调大气饱和水汽压差在气候和生态系统研究中的重要性，尤其关注大气饱和水汽压差增加对干旱区荒漠植被变化的影响。

4 结论

基于1961—2021年开都-孔雀河流域的常规气象观测数据，分析流域大气饱和水汽压差及其相关变量的变化趋势，探讨不同环境下大气饱和水汽压差变化特征，主要结论如下：

（1）1961—2021年开都-孔雀河流域年及四季大气饱和水汽压差变化均呈增加趋势，且在1997年发生突变，其中1961—1996年大气饱和水汽压差呈下降趋势，为-0.023 kPa·(10a)$^{-1}$，而1997—2021年呈上升趋势，增长率为0.029 kPa·(10a)$^{-1}$，因此，1997年以后流域大气干旱加剧。季节来看，春季上升速率最快，达到了0.05 kPa·(10a)$^{-1}$。

（2）开都-孔雀河流域山区、绿洲和荒漠区大气饱和水汽压差趋势与气温和实际水汽压的变化趋势一致，但荒漠区的增长速率更快；各分区四季大气饱和水汽压差趋势与年变化趋势一致，且冬季增幅最小。

（3）大气饱和水汽压差变化主要受到实际水汽压和饱和水汽压的影响，1961—2021年开都-孔雀河流域饱和水汽压与实际水汽压均呈上升趋势，且夏季增加速度最快；实际水汽压的增长速率小于饱和水汽压的增长速率。

（4）大气饱和水汽压差变化与温度变化呈正相关，与相对湿度变化呈负相关，相对湿度对流域大气饱和水汽压差变化的贡献更为显著，1997年以来气温快速升高而相对湿度快速降低是导致大气饱和水汽压差加速增长的主要原因。

参考文献(References)：

[1] Balliu A, Zheng Y, Sallaku G, et al. Environmental and cultivation factors affect the morphology, architecture and performance of root systems in soilless grown plants[J]. Horticulturae, 2021, 7(8): 243.

[2] Zhong Z, He B, Wang Y P, et al. Disentangling the effects of vapor pressure deficit on northern terrestrial vegetation productivity[J]. Science Advances, 2023, 9(32): eadf3166.

[3] 赵卉忱, 贾根锁, 王鹤松, 等. 中国半干旱区草甸草原和典型草原碳通量日变化特征[J]. 气候与环境研究, 2020, 25(2): 172-184. [Zhao Huichen, Jia Gensuo, Wang Hesong, et al. Diurnal variations of the carbon fluxes of semiarid meadow steppe and typical steppe in China[J]. Climatic and Environmental Research, 2020, 25(2): 172-184.]

[4] Yuan W, Zheng Y, Piao S, et al. Increased atmospheric vapor pressure deficit reduces global vegetation growth[J]. Science Advances, 2019, 5(8): eaax1396.

[5] Lobell D B, Hammer G L, McLean G, et al. The critical role of extreme heat for maize production in the United States[J]. Nature Climate Change, 2013, 3(5): 497-501.

[6] Novick K A, Ficklin D L, Stoy P C, et al. The increasing importance of atmospheric demand for ecosystem water and carbon flux-

es[J]. Nature Climate Change, 2016, 6(11): 1023-1027.
[7] 李晓菲, 徐长春, 李路, 等. 21世纪开都-孔雀河流域未来气候变化情景预估[J]. 干旱区研究, 2019, 36(3): 556-566. [Li Xiaofei, Xu Changchun, Li Lu, et al. Projection of future climate change in the Kaidu-Kongqi River Basin in the 21st Century[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(3): 556-566.]
[8] IPCC. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2022: 3056.
[9] IPCC. Climate Change 2023: Synthesis Report[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2023: 1-36.
[10] Zhang H, Wu B, Yan N, et al. An improved satellite-based approach for estimating vapor pressure deficit from MODIS data[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2014, 119(21): 212-256.
[11] Dai A. Increasing drought under global warming in observations and models[J]. Nature Climate Change, 2013, 3(1): 52-58.
[12] 李旭谱, 张福平, 胡猛, 等. 基于SPOT NDVI的植被覆盖时空演变规律分析——以西北五省为例[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 35(5): 180-184, 199. [Li Xupu, Zhang Fuping, Hu Meng, et al. Analysis of the regulation of spatial-temporal variation of the vegetation coverage based on SPOT NDVI data—A case study in Northwest China[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2012, 35(5): 180-184, 199.]
[13] 董翰林, 王文婷, 谢云, 等. 新疆气候干湿变化特征及其影响因素[J]. 干旱区研究, 2023, 40(12): 1875-1884. [Dong Hanlin, Wang Wenting, Xie Yun, et al. Climate dry-wet conditions,changes, and their driving factors in Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(12): 1875-1884.]
[14] 虞佳陆, 张景, 张敏, 等. 基于标准化前期降水蒸散指数的新疆干旱时空演变特征[J]. 干旱地区农业研究, 2023, 41(4): 275-288. [Yu Jialu, Zhang Jing, Zhang Min, et al. SAPEI—Based spatial and temporal variation characteristics of drought in Xinjiang [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2023, 41(4): 275-288.]
[15] 潘银妹, 戴雪荣, 毛东雷. 新疆开都河-孔雀河流域近59年极端气候事件时空变化特征[J]. 湖北农业科学, 2022, 61(15): 42-49, 74. [Pan Yinmei, Dai Xuerong, Mao Donglei. Characteristics of spatial and temporal changes of extreme climate events in the Kaidou River-Kongque River Basin in Xinjiang in recent 59 years[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2022, 61(15): 42-49, 74.]
[16] 石光義. 基于SWAT模型的新疆开都-孔雀河流域径流时空变化研究[D]. 长春: 长春工程学院, 2020. [Shi Guangyi. Study on Runoff Spatiotemporal Variation of Xinjiang Kaidu-Kongqi River Basin Based on SWAT Model[D]. Changchun: Changchun Institute of Technology, 2020.]
[17] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. FAO Irrigation and drainage paper No. 56[J]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998, 56(97): e156.
[18] Aguilar E, Peterson T, Obando P R, et al. Changes in precipitation and temperature extremes in Central America and northern South America, 1961-2003[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2005, 110(D23): 1-15.
[19] Jaeckel L A. Estimating regression coefficients by minimizing the dispersion of the residuals[J]. The Annals of Mathematical Statistics, 1972, 43(5): 1449-1458.
[20] Wang H, Chen Y, Chen Z. Spatial distribution and temporal trends of mean precipitation and extremes in the arid region, Northwest of China, during 1960-2010[J]. Hydrological Processes, 2013, 27 (2): 1807-1818.
[21] Dodge Y. The Concise Encyclopedia of Statistics[M]. New York: Springer, 2008.
[22] Fang S, Yan J, Che M, et al. Climate change and the ecological responses in Xinjiang, China: Model simulations and data analyses [J]. Quaternary International, 2013, 311: 108-116.
[23] Li B, Chen Y, Shi X, et al. Temperature and precipitation changes in different environments in the arid region of Northwest China[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2013, 112(3-4): 589-596.
[24] Yao J, Chen Y, Yang Q. Spatial and temporal variability of water vapor pressure in the arid region of Northwest China, during 1961-2011[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2016, 123: 683-691.
[25] Li M, Yao J, Guan J, et al. Observed changes in vapor pressure deficit suggest a systematic drying of the atmosphere in Xinjiang of China[J]. Atmospheric Research, 2021, 248: 105199.
[26] 韩永贵, 韩磊, 黄晓宇, 等. 基于指数平滑和ARIMA模型的西北地区饱和水汽压差预测[J]. 干旱区研究, 2021, 38(2): 303-313. [Han Yongui, Han Lei, Huang Xiaoyu, et al. Prediction of vapor pressure deficit in Northwest China based on exponential and ARIMA models[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(2): 303-313.]
[27] 李素雲, 祁栋林, 温婷婷, 等. 1961—2020年青海省饱和水汽压差变化特征及影响因子分析[J]. 干旱区研究, 2023, 40(2): 173-181. [Li Suyun, Qi Donglin, Wen Tingting, et al. The variation characteristics and influencing factors of vapor pressure deficit in Qinghai Province from 1961 to 2020[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(2): 173-181.]
[28] Simmons A, Willett K, Jones P, et al. Low-frequency variations in surface atmospheric humidity, temperature, and precipitation: Inferences from reanalyses and monthly gridded observational data sets[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2010, 115 (D1): 1-21.
[29] Willett K, Dunn R, Thorne P, et al. HadISDH land surface multivariable humidity and temperature record for climate monitoring [J]. Climate of the Past, 2014, 10(6): 1983-2006.
[30] Rawson H, Begg J, Woodward R. The effect of atmospheric humidity on photosynthesis, transpiration and water use efficiency of leaves of several plant species[J]. Planta, 1977, 134: 5-10.
[31] 於嘉禾, 王卫光, 陈泽峰. 全球旱地饱和水汽压差和根区土壤水分变化对植被生产力的影响及其成因[J]. 生态学报, 2024, 44

(11): 4808−4819. [Yu Jiahe, Wang Weiguang, Chen Zefeng. Influences of vapor pressure deficit and root-zone soil moisture changes on vegetation productivity and its causes across global drylands [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(11): 4808−4819.]

[32] Yao J, Zhao Y, Chen Y, et al. Multi-scale assessments of droughts: A case study in Xinjiang, China[J]. Science of the Total Environment, 2018, 630: 444−452.

[33] Chen Y, Li Z, Fan Y, et al. Progress and prospects of climate change impacts on hydrology in the arid region of Northwest China [J]. Environmental Research, 2015, 139: 11−19.

Changes in atmospheric vapor pressure deficit in the Kaidu-Kongque River Basin and its influencing factors

LI Xiaoqi[1], LI Moyan[1,2], LI Jiahui[1], YAO Junqiang[3], XU Xingbin[1,2]

(1. School of Geographic Science and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, Xinjiang, China;
2. Xinjiang Key Laboratory of Lakes Environment and Resources in Arid Zone, Urumqi 830054, Xinjiang, China;
3. Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi 830002, Xinjiang, China)

Abstract: In this study, we analyzed meteorological observation data from the Kaidu-Kongque River basin in Xinjiang between 1961 and 2021 to investigate trends of vapor pressure deficit (*VPD*), as well as saturated (*es*) and actual (*ea*) water vapor pressure. We explored *VPD* changes across mountainous, oasis, and desert environments along with the factors influencing these changes. The results revealed the following: (1) Annual and seasonal *VPD* showed an upward trend from 1961 to 2021, characterized by distinct phases in which a sudden change occurred in 1997, shifting from a downward trend from 1961 to 1996 to an upward trend from 1997 to 2021, highlighting an intensification of atmospheric drought post 1997, particularly in spring. (2) *VPD* trends align with those of temperature and *ea*, showing the most significant increase in desert environments, followed by oasis and mountainous environments. (3) *VPD* changes are primarily affected by *ea* and *es*, positively correlated with temperature changes and negatively correlated with Relative Humidity changes. The rapid rise in temperature and decline in *RH* since 1997 are the primary causes of accelerated *VPD*, with the growth rate of *ea* being lower than that of *es*. These findings enhance our understanding of atmospheric drought and its response to climate change.

Keywords: *VPD*; actual water vapor pressure; variation characteristics; influencing factors; Kaidu-Kongque River